



2.2 Sistem Proteksi³

Keandalan dan kemampuan suatu **sistem tenaga listrik** dalam melayani konsumen sangat tergantung pada **sistem proteksi** yang digunakan. Oleh sebab itu dalam perancangan suatu **sistem tenaga listrik**, perlu dipertimbangkan kondisi-kondisi gangguan yang mungkin terjadi pada sistem, melalui analisa gangguan.

Pada dasarnya gangguan dapat terjadi karena kegagalan operasi peralatan dalam sistem, kesalahan manusia dan karena alam. Langkah yang dapat diambil untuk mencegah terjadinya gangguan antara lain dengan menggunakan isolasi yang baik, membuat koordinasi isolasi dan menghindari kesalahan operasi. Tetapi langkah – langkah tersebut dibatasi oleh faktor ekonomis dan alam. Karenanya para engineer sepakat :*gangguan boleh saja terjadi dan tidak dapat dihindari namun dampaknya harus diminimisasi*. Tabel 1 menunjukkan data statistik persentase gangguan pada sistem tenaga

Tabel 2.1 Frekuensi Gangguan Untuk Berbagai Beralatan Sistem Tenaga

Peralatan	% Terhadap Total
SUTT	50
Kabel	10
Switchgear	15
Trafo Daya	12
Trafo arus dan trafo tegangan	2
Peralatan control	3
Lain-lain	8

Dari Table 2.1 terlihat SUTT mengalami gangguan paling sering. Jenis

³ J. Sukarto. 2000. Diktat kuliah sistem proteksi teknik elektro UI, Percetakan UI (Universitas Indonesia)



gangguan yang terjadi di SUTT ditunjukkan pada tabel 2.2

Tabel 2.2 Frekuensi Jenis Gangguan Pada SUTT

Peralatan	% Kejadian
Fasa ke tanah (L-G)	85
Fasa ke fasa (L-L)	8
Fasa ke fasa ke tanah (L-L-G)	5
Tiga fasa (L-L-L)	2

Dari hasil *analisa gangguan*, dapat ditentukan **sistem proteksi** yang akan digunakan, seperti: spesifikasi **switchgear**, rating **circuit breaker** (CB) serta penetapan besaran-besaran yang menentukan bekerjanya suatu **relay** (setting relay) untuk keperluan proteksi.

2.2.1. Definisi sistem proteksi

Proteksi sistem tenaga listrik adalah sistem proteksi yang dipasang pada peralatan-peralatan listrik suatu sistem tenaga listrik, misalnya generator, transformator, jaringan dan lain-lain, terhadap kondisi abnormal operasi sistem itu sendiri.

Kondisi abnormal itu dapat berupa antara lain: **hubung singkat, tegangan lebih, beban lebih, frekuensi sistem rendah, asinkron** dan lain-lain.

2.2.2. Manfaat sistem proteksi^[2]

Adapun untuk menjaga suatu sistem guna keamanan dan kehandalan dari sistem tersebut adalah sebagai berikut :

- a. Menghindari ataupun untuk mengurangi kerusakan peralatan-peralatan akibat gangguan (kondisi abnormal operasi sistem). Semakin cepat reaksi perangkat



proteksi yang digunakan maka akan semakin sedikit pengaruh gangguan kepada kemungkinan kerusakan alat.

- b. Cepat melokalisir luas daerah yang mengalami gangguan, menjadi sekecil mungkin.
- c. Dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi kepada konsumen dan juga mutu listrik yang baik.
- d. Mengamankan manusia terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh **listrik**.

Pengetahuan mengenai arus-arus yang timbul dari berbagai **tipe gangguan** pada suatu lokasi merupakan hal yang sangat esensial bagi pengoperasian **sistem proteksi** secara efektif. Jika terjadi gangguan pada sistem, para operator yang merasakan adanya gangguan tersebut diharapkan segera dapat mengoperasikan circuit-circuit Breaker yang tepat untuk mengeluarkan sistem yang terganggu atau memisahkan pembangkit dari jaringan yang terganggu. Sangat sulit bagi seorang operator untuk mengawasi gangguan-gangguan yang mungkin terjadi dan menentukan CB mana yang dioperasikan untuk mengisolir gangguan tersebut secara manual.

Mengingat arus gangguan yang cukup besar, maka perlu secepat mungkin dilakukan proteksi. Hal ini perlu suatu peralatan yang digunakan untuk mendeteksi keadaan-keadaan yang tidak normal tersebut dan selanjutnya menginstruksikan circuit breaker yang tepat untuk bekerja memutuskan rangkaian atau sistem yang terganggu. Dan peralatan tersebut kita kenal dengan relay.

Ringkasnya proteksi dan tripping otomatis circuit-circuit yang berhubungan, mempunyai dua fungsi pokok:

- a. Mengisolir peralatan yang terganggu, agar bagian-bagian yang lainnya tetap beroperasi seperti biasa.
- b. Membatasi kerusakan peralatan akibat panas lebih (over heating), pengaruh gaya-gaya mekanik dst.



"Koordinasi antara relay dan circuit breaker(CB) dalam mengamati dan memutuskan gangguan disebut sebagai sistem proteksi".

Proteksi harus sanggup menghentikan arus gangguan sebelum arus tersebut naik mencapai harga yang berbahaya. Proteksi dapat dilakukan dengan Sekering atau Circuit Breaker.

Proteksi juga harus sanggup menghilangkan gangguan tanpa merusak peralatan proteksi itu sendiri. Untuk ini pemilihan peralatan proteksi harus sesuai dengan kapasitas arus hubung singkat "breaking capacity" atau Repturing Capacity.

Disamping itu, sistem proteksi yang diperlukan harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

- a. Sekering atau circuit breaker harus sanggup dilalui arus nominal secara terus menerus tanpa pemanasan yang berlebihan (overheating).
- b. Overload yang kecil pada selang waktu yang pendek seharusnya tidak menyebabkan peralatan bekerja.
- c. Sistem Proteksi harus bekerja walaupun pada overload yang kecil tetapi cukup lama, sehingga dapat menyebabkan overheating pada rangkaian penghantar.
- d. Sistem Proteksi harus membuka rangkaian sebelum kerusakan yang disebabkan oleh arus gangguan yang dapat terjadi.
- e. Proteksi harus dapat melakukan "pemisahan" (discriminative) hanya pada rangkaian yang terganggu yang dipisahkan dari rangkaian yang lain yang tetap beroperasi.

Proteksi overload dikembangkan jika dalam semua hal rangkaian listrik diputuskan sebelum terjadi overheating. Jadi disini overload action relatif lebih lama dan mempunyai fungsi inverse terhadap kwadrat dari arus.

Proteksi gangguan hubung singkat dikembangkan jika action dari sekering atau circuit breaker cukup cepat untuk membuka rangkaian sebelum arus dapat mencapai harga yang dapat merusak akibat overheating, arcing atau ketegangan mekanik.



2.2.3. Sifat – sifat sistem proteksi

- a. Diskriminasi : peka pada arus gangguan minimum tetapi tidak untuk arus beban maksimum
- b. Selektivitas : hanya bekerja pada bagian yang terganggu dan tidak pada bagian yang sehat, artinya sistem proteksi hanya pada daerah pengamannya saja atau mendapat prioritas utama untuk bekerja → main protection
- c. Sensitivitas (kepekaan) : segera merasakan adanya gangguan
- d. Realibilitas (keandalan) : sistem proteksi harus bekerja cepat dan dapat diandalkan.
- e. Cepat : segera bekerja untuk menghindari waktu penyelesaian kritis (clearing time) yang terlampaui, kerusakan peralatan karena dialiri arus besar dengan jangka waktu lama dan gangguan tetap yang akan menyebabkan tegangan jatuh.

Sifat – sifat tersebut juga menjadi persyaratan sistem proteksi yang baik ditambah dengan persyaratan lain seperti :

2.2.4. Proteksi pendukung

Proteksi pendukung (back up) merupakan susunan yang sepenuhnya terpisah dan yang bekerja untuk mengeluarkan bagian yang terganggu apabila proteksi utama tidak bekerja (fail). Sistem pendukung ini sedapat mungkin indenpenden seperti halnya proteksi utama, memiliki trafo-trafo dan rele-rele tersendiri. Seringkali hanya tripping CB dan trafo -trafo tegangan yang dimiliki bersama oleh keduanya. Tiap-tiap sistem proteksi utama melindungi suatu area atau zona sistem daya tertentu. Ada kemungkinan suatu daerah kecil diantara zona - zona yang berdekatan misalnya antara trafo-trafo arus dan circuit breaker-circuit breaker tidak dilindungi. Dalam keadaan seperti ini sistem back up (yang



dinamakan, remote back up) akan memberikan perlindungan karena berlapis dengan zona-zona utama.

Pada sistem distribusi aplikasi back up digunakan tidak seluas dalam sistem transmisi, cukup jika hanya mencakup titik-titik strategis saja. Remote back up akan bereaksi lambat dan biasanya memutus lebih banyak dari yang diperlukan untuk mengeluarkan bagian yang terganggu.

2.2.5. Pertimbangan ekonomis

Dalam sistem distribusi aspek ekonomis hampir mengatasi aspek teknis, oleh karena jumlah feeder, trafo dan sebagainya yang begitu banyak, asal saja persyaratan keamanan yang pokok dipenuhi. Dalam suatu sistem transmisi justru aspek teknis yang penting. Proteksi relatif mahal, namun demikian pula sistem atau peralatan yang dilindungi dan jaminan terhadap kelangsungan peralatan sistem adalah vital.

Untuk tujuan tersebut, biasanya digunakan dua sistem proteksi yang terpisah, yaitu proteksi primer atau proteksi utama dan proteksi pendukung (*back up*).

2.2.6. Komponen-komponen sistem proteksi

Secara umum, adapun komponen-komponen dari sistem proteksi terdiri dari 6 komponen yang ada dibawah ini yaitu:

- a. Sakelar Pemutus, CB (*Circuit Breaker*, PMT)
- b. Relay
- c. Trafo arus (*Current Transformer*, CT)
- d. Trafo tegangan (*Potential Transformer*, PT)
- e. Kabel kontrol
- f. Catu daya, Suplai (*batere*)



Peralatan proteksi dipilih berdasarkan kapasitas arus hubung singkat ‘*Breaking capacity*’ atau ‘*Repturing Capacity*’.

2.3 Rele Proteksi

Sistem proteksi/pengaman suatu tenaga listrik yang membentuk suatu pola pengaman tidaklah hanya relay pengaman saja tetapi juga *Current Transformer* (CT) dan *Potensial Transformer* (PT) yang merupakan perangkat instrumen pada relay pengaman, sumber daya DC merupakan sumber untuk mengoperasikan relay pengaman dan pemutus tenaga PMT yang akan menerima perintah akhir dari relay pengaman.

Jadi sistem proteksi/pengaman tenaga listrik adalah satu kesatuan antara CT, VT, Relay, sumber DC, dan PMT. Adanya kesalahan dari salah satu komponen tersebut akan berakibat sistem tersebut tidak jalan.

Relay proteksi dapat merasakan adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran-besaran yang diterimanya, misalnya arus, tegangan, daya, sudut fasa, frekuensi, impedansi dan sebagainya, dengan besaran yang telah ditentukan, kemudian mengambil keputusan untuk seketika ataupun dengan perlambatan waktu membuka pemutus tenaga^[6]

Tugas relay proteksi juga berfungsi menunjukkan lokasi dan macam gangguannya. Dengan data tersebut memudahkan analisa dari gangguannya. Dalam beberapa hal relay hanya memberi tanda adanya gangguan atau kerusakan, jika dipandang gangguan atau kerusakan tersebut tidak membahayakan.

Dari uraian di atas maka relay proteksi pada sistem tenaga listrik berfungsi untuk:

- a. Merasakan, mengukur dan menentukan bagian sistem yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga sistem lainnya yang tidak terganggu dapat beroperasi secara normal.

⁶ PT. PLN (Persero) P3B Sumatera UPT Padang, “Relay dan Kontrol,” Padang



- b. Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang terganggu.
- c. Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem yang lain yang tidak terganggu di dalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan.
- d. Memperkecil bahaya bagi manusia.

Untuk mendapatkan daerah pengaman yang cukup baik, dalam sistem tenaga listrik terbagi di dalam suatu daerah pengaman yang cukup dengan pemutusan subsistem seminimum mungkin.

Untuk memenuhi fungsi di atas, relay proteksi harus memenuhi persyaratan berikut:

- a. Sensitif
- b. *Reliable* (Dapat Diandalkan)
- c. Selektif
- d. Cepat
- e. Ekonomis dan Sederhana.

Fungsi rele proteksi pada suatu sistem tenaga listrik guna menjaga suatu system agar berjalan sebagaimana mestinya antara lain:

- a. Mendeteksi adanya gangguan atau keadaan abnormal lainnya pada bagian sistem yang diamankannya.
- b. Melepaskan bagian sistem yang terganggu sehingga bagian sistem lainnya dapat terus beroperasi.
- c. Memberitahu operator tentang adanya gangguan dan lokasinya.

Rele proteksi dalam fungsinya sebagai pengaman memiliki beberapa syarat yang harus dipenuhi, yaitu:



2.3.1. Kepekaan (*sensitivity*)

Pada prinsipnya rele harus cukup peka sehingga dapat mendeteksi gangguan di kawasan pengamanannya meskipun gangguan yang ada relatif kecil

2.3.2. Keandalan (*reliability*)

Maksud dari keandalan adalah bahwa sebuah rele proteksi harus selalu berada pada kondisi yang mampu melakukan pengamanan pada daerah yang diamankan

Keandalan memiliki 3 aspek, antara lain:

- a. *Dependability*, adalah kemampuan suatu sistem rele untuk beroperasi dengan baik dan benar. Pada prinsipnya pengaman harus dapat diandalkan bekerjanya (dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu), tidak boleh gagal bekerja. Dengan kata lain *dependability*-nya harus tinggi.
- b. *Security*, adalah tingkat kepastian suatu sistem relai untuk tidak salah dalam bekerja. Salah kerja, misalnya lokasi gangguan berada di luar pengamanannya, tetapi salah kerja mengakibatkan pemadaman yang seharusnya tidak perlu terjadi.
- c. *Availability*, adalah perbandingan antara waktu di mana pengaman dalam keadaan siap kerja (*actually in service*) dan waktu total operasinya.

2.3.3. Selektifitas (*selectivity*)

Maksudnya pengaman harus dapat membedakan apakah gangguan terletak didaerah proteksi utama dimana pengaman harus bekerja cepat atau terletak di luar zona proteksinya dimana pengaman harus bekerja dengan waktu tunda atau tidak bekerja sama sekali.

2.3.4. Kecepatan kerja (*speed of operation*)

Untuk memperkecil kerugian atau kerusakan akibat gangguan, maka bagian yang terganggu harus dipisahkan secepat mungkin dari bagian sistem lainnya. Selang waktu sejak dideteksinya gangguan sampai dilakukan pemisahan gangguan



Keterangan :

- CB = Circuit Breaker
 TC = Trip Coil
 CBI = Arus yang mengalir pada saluran yang diamankan
 CT = Transformator Arus
 Ir = Arus yang mengalir pada relai
 C = Relai arus lebih
 Ip = Arus pick-up dari relai

2.3.7. Relai Gangguan Frekuensi (*Frequency Fault Relay*)

Relai ini berfungsi untuk mendeteksi adanya perubahan frekuensi dalam nilai yang besar secara tiba – tiba. Kisaran frekuensi yang diijinkan adalah $\pm 3\%$ sampai $\pm 7\%$ dari nilai frekuensi nominal. Penurunan frekuensi disebabkan oleh adanya kelebihan permintaan daya aktif di jaringan atau kerusakan regulator frekuensi. Frekuensi yang turun menyebabkan naiknya arus magnetisasi pada generator yang akan menaikkan temperatur. Pada turbin uap, hal tersebut akan mereduksi umur *blade* pada rotor. Kenaikan frekuensi disebabkan oleh adanya penurunan permintaan daya aktif pada jaringan atau kerusakan regulator frekuensi. Frekuensi yang naik akan menyebabkan turunnya nilai arus magnetisasi pada generator yang akan menyebabkan generator kekurangan medan penguat. Sensor relai frekuensi dipasang pada tiap fasa yang keluar dari generator.

2.4 *Load Shedding*

Load shedding adalah sistem yang didesain untuk melepaskan beban secara otomatis ketika jumlah daya yang dibangkitkan berkurang. Pelepasan secara otomatis dilakukan dengan cara mendeteksi frekuensi atau dengan melihat kondisi sumber daya pembangkit yang beroperasi tidak mencukupi kebutuhannya.



Load shedding didasarkan pada kondisi frekuensi. Pada saat frekuensi turun pada level tertentu akibat adanya pembangkit yang trip, maka dilepaskan beban yang tidak begitu penting yang tidak menyebabkan operasi pengolahan terganggu, biasanya perumahan. Jika frekuensi masih turun terus, maka beban berikutnya yang dilepaskan, mungkin mengorbankan salah satu pabrik, demikian seterusnya hingga dicapai frekuensi minimal yang ditentukan.

Pada setiap pembangkit, terdapat governor yang berfungsi untuk mengatur kecepatan turbin dengan cara mengendalikan kuantitas bahan bakar yang masuk ke dalam ruang pembakaran di turbin. Jika frekuensi daya yang dibangkitkan bertambah atau berkurang, maka governor akan menurunkan atau menaikkan kecepatan turbin, sehingga mencapai kestabilan frekuensi yang diinginkan.

Jika terjadi gangguan yang mengakibatkan berkurangnya daya pembangkit hanya hingga 10 % dari kapasitas pembangkitan yang ada, maka penurunan frekuensi akan terjadi secara perlahan sehingga tidak akan menyebabkan hal-hal serius pada sistem. Hal ini disebabkan karena governor dari pembangkit masih sempat bekerja. Tetapi apabila berkurangnya jumlah pembangkitan daya lebih besar lagi, maka turunnya frekuensi akan semakin cepat sehingga dapat mencapai harga yang relatif rendah hanya dalam waktu yang sangat singkat. Dalam keadaan ini, governor tidak sempat mengejar ketertinggalan frekuensi sehingga diperlukan pelepasan sebagian beban agar frekuensi yang ditentukan kembali stabil.

2.4.1. Definisi Critical Rating

Definisi dari *critical rating* pada suatu perusahaan adalah sebagai berikut: *Critical Rating* adalah ukuran untuk dapat mengetahui perbedaan relative pentingnya peranan suatu peralatan terhadap peralatan lain dalam suatu proses produksi (perusahaan), *Critical rating* menyatakan tingkat besarnya konsekuensi yang akan diterima terhadap kriteria yang di setujui apabila peralatan tersebut mengalami kerusakan.



2.4.2. Pembagian Jenis Beban (*Critical Rating*)

Penggolongan dari peralatan berdasarkan tingkat kekritisannya (*critically order*) dapat dilakukan sebagai berikut :

1. Vital

Adalah peralatan yang dipergunakan untuk proses utama, vital terhadap proses utama, vital terhadap operasi komersial dan keselamatan petugas. Bila peralatan tersebut rusak akan menyebabkan proses shutdown, mempunyai biaya penggantian suku cadang yang mahal, plant dan keselamatan petugas tidak terjamin. Peralatan ini memerlukan frekuensi monitoring yang tinggi secara periodik.

2. Essential

Adalah peralatan yang dipergunakan dalam proses atau essential terhadap komersial. Bila peralatan tersebut rusak akan menyebabkan pengurangan produksi dan mempunyai biaya penggantian suku cadang yang mahal. Peralatan ini memerlukan frekuensi monitoring yang tinggi secara periodic.

3. Support

Adalah peralatan yang digunakan dalam proses dan memerlukan periodic monitoring secara rutin. Bila peralatan rusak, tidak akan berpengaruh terhadap *commercial operation dan safety*.

4. Operational

Adalah semua peralatan yang tidak termasuk kategori 1, 2 dan 3, dan tidak memerlukan periodic monitoring secara rutin. Bila peralatan rusak, tidak akan berpengaruh terhadap keselamatan dan operasi komersial.

2.4.3. Kestabilan sistem tenaga listrik

Stabilitas sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga listrik atau bagian komponennya untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan sistem tersebut. Suatu sistem tenaga listrik yang baik harus memenuhi beberapa syarat yaitu;



- a. *Reliability* adalah: Kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus.
- b. *Quality* adalah: Kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi.
- c. *Stability* adalah: Kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan.

2.4.4. Kestabilan sistem tenaga

Kestabilan sistem tenaga secara keseluruhan di bagi menjadi:

1. Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan dari mesin-mesin sinkron yang saling terinterkoneksi pada sistem tenaga listrik untuk menjaga kesinkronan setelah mengalami gangguan.
2. Kestabilan frekuensi (*Frequency Stability*) mengacu pada kemampuan dari sistem tenaga untuk menjaga frekuensi *steady* setelah mengalami gangguan yang mengakibatkan ketidak seimbangan yang signifikan antara pembangkitan dan beban.
3. Kestabilan tegangan adalah kemampuan dari sistem tenaga untuk menjaga tegangan *steady* disemua bus dalam sistem setelah mengalami gangguan.

2.4.5. Kestabilan sudut, frekuensi, dan tegangan

Kestabilan sudut, frekuensi, dan tegangan dapat dibagi menjadi dua sub-kategori;

1. Kestabilan *Steady State*

Kemampuan dari suatu sistem tenaga mempertahankan sinkronisasi antara mesin-mesin dalam sistem setelah mengalami gangguan kecil

2. Kestabilan Transien

Kemampuan dari suatu sistem tenaga mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak selama sekitar satu



swing (yang pertama) dengan asumsi bahwa AVR dan governor belum bekerja.

2.4.6. Skema pelepasan beban

Pada pelepasan beban secara otomatis, diperlukan pemasangan alat-alat yang dapat melindungi sistem secara cepat apabila terjadi perubahan frekuensi yang besar di dalam sistem. Oleh karena itu perlu digunakan rele frekuensi rendah (*UFR/Under Frequency Relay*) yang dapat mendeteksi nilai frekuensi sistem pada suatu batas tertentu. Tabel 2.3. dibawah merupakan skema pelepasan beban tiga langkah pada standar ANSI/IEEE C37.106-1987 yang telah diubah dalam persen.

Tabel 2.3 Skema load shedding 3 langkah^[1]

Step	Frequency Trip Point (Hz)	Frequency Trip Point (%)	Percent of Load Shedding (%)	Fixed Time Delay (Cycles) on Relay
1	49.4	98.83	10	6
2	49.08	98.17	15	6
3	48.75	97.5	Sebelum 48.5 Hz (97 %)	

2.4.7. Standar yang Berkaitan dengan Efek Transien

a. Standar Undervoltage dan Voltage sagging

Tegangan sistem harus dipertahankan dengan batasan sebagai berikut :^[5]

500 kV +5%, -5% 70 kV +5%, -10%

150 kV +5%, -10% 20 kV +5%, -10%

¹ ANSI/IEEE C37.106-1987, "*IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants*".

⁵ PLN Distribusi Jakarta Raya dan Tangerang, 1982, "*Pengoperasian dan Pemeliharaan Jaringan Distribusi (Konsep Standar)*", PLN, Jakarta.



Penurunan tegangan dalam waktu yang sekejap, dinamakan kedip tegangan. Kedip Tegangan didefinisikan sebagai fenomena penurunan magnitude tegangan efektif terhadap harga nominalnya selama interval waktu.

Tabel 2.4 *Voltage sagging menurut standar SEMI F47*^[4]

Second (s)	Cycles at 60 Hz	Cycles at 50 Hz	Percent (%) of Equipment
< 0.05 s	< 3	< 2.5	Not Spectified
0.05 to 0.2 s	3 to 12	2.5 to 10	50%
0.2 to 0.5 s	12 to 30	10 to 25	70%
0.5 to 1.0 s	30 to 60	25 to 50	80%
>1.0 s	> 60	> 50	Not Spectified

b. *Standar Frekuensi*

Menurut standar IEEE.std.c37.106.1987 mengatur tentang fluktuasi frekuensi dimana untuk batas *overfrequency* sebesar +0.8% dari frekuensi nominal, Sedangkan untuk batas *underfrequency* sebesar -0.8% dari frekuensi nominalnya. Berikut standar IEEE.std.c37.106. 1987 dapat dilihat pada table.

Tabel 2.5 Batas Durasi *Overfrequency* Dan *Underfrequency* Yang Telah Diubah Dalam Persen

Under Frequency limit	Overfrquency limit	Minimum time

⁴ Pasific Gas and Electric Company, "*Voltage Sag Immunity Standards SEMI-F47 and F42*", Power Quality Bulletin, 2007.



50 - 49.6 Hz (100 - 99.2 %)	50.0–50.4 Hz (100.0-100.8 %)	N/A (continuous operating range)
49.7 - 48.3 Hz (97.3 - 96.5%)	50.5–51.2 Hz (101.0-102.5 %)	3
48.2 - 47.8 Hz (96.3 - 95.7%)	51.3–51.4 Hz (102.7-102.8 %)	30
48.2–47.8 Hz (96.3-95.7 %)		7.5
47.7–47.4 Hz (95.5-94.8 %)		45
47.3–47.1 Hz (94.7-94.2 %)		7.2
Less than 47.0 Hz	Greater than 51.4 Hz	Instantaneous trip

2.5 Auto Load Shedding

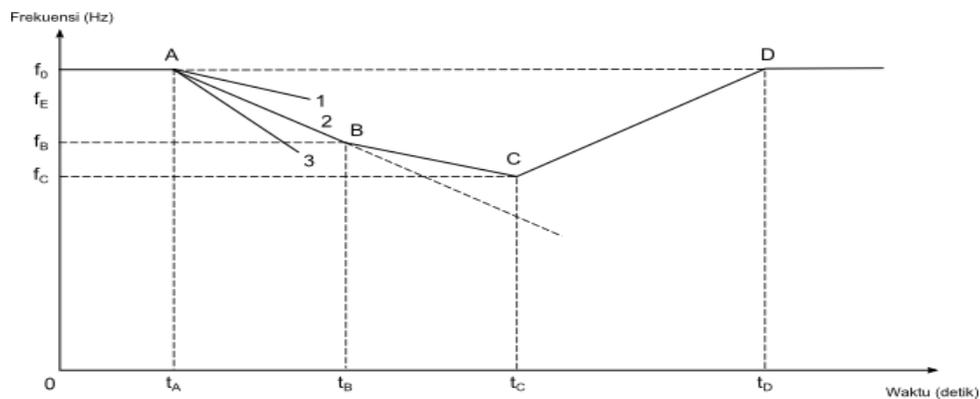
Secara manual, pelepasan beban dapat dilakukan dilakukan dengan cara menurunkan *breaker* beban tersebut. Cara ini tidaklah efektif, karena untuk melakukannya diperlukan operator yang harus selalu memantau nilai frekuensi dan menurunkan *breaker* jika terjadi penurunan frekuensi yang cukup besar. Oleh karena itu diperlukan sebuah alat yang mampu membaca nilai frekuensi, mempunyai respon yang cepat, serta dapat dikonfigurasi sehingga dapat disesuaikan untuk sistem *load shedding* yang direncanakan.

Alat yang tepat untuk tujuan tersebut adalah *under frequency rele (UFR)*. UFR digunakan untuk mendeteksi frekuensi rele pada batas yang telah ditentukan. Misalnya untuk sistem frekuensi 50Hz, batas frekuensi diatur antara 45-49,5 Hz. UFR akan bekerja dan melepaskan beban apabila frekuensi sistem berada di bawah frekuensi yang telah ditentukan. Pemilihan setting dari frekuensi berbeda-beda, tergantung dari keadaan sistem. Beban-beban yang akan dilepaskan ditentukan



terlebih dahulu dan dilepaskan secara bertahap pada tiap-tiap tingkat frekuensi yang telah ditentukan.

Jika terdapat gangguan dalam sistem yang menyebabkan daya yang tersedia tidak dapat melayani beban, misalnya karena ada unit pembangkit yang *trip*, maka untuk menghindari sistem menjadi *blackout* perlu dilakukan pelepasan beban. Keadaan kritis dalam sistem karena jatuhnya unit pembangkit dapat terdeteksi melalui frekuensi sistem yang menurun dengan cepat.



Gambar 2.3 Grafik Perubahan Frekuensi Sebagai Fungsi Waktu Dengan Adanya Pelepasan Beban

Turunnya frekuensi dapat mengikuti garis 1, garis 2, atau garis 3. Makin besar unit pembangkit yang jatuh, makin besar daya tersedia hilang, makin cepat frekuensi menurun. Kecepatan menurunnya frekuensi tergantung dari besar kecilnya inersia sistem. Makin besar inersia sistem, makin handal sistemnya, makin lambat frekuensi menurun.

Dalam gambar 2.3, dimisalkan frekuensi menurun mengikuti garis 2. Setelah mencapai titik B dilakukan pelepasan beban tingkat pertama oleh *UFR* yang bekerja setelah mendeteksi frekuensi sebesar f_B . Dengan adanya pelepasan beban tingkat pertama maka penurunan frekuensi berkurang kecepatannya. Sampai di titik C *UFR* mendeteksi frekuensi sebesar f_C dan akan melakukan pelepasan beban tingkat kedua.



Setelah pelepasan beban tingkat kedua frekuensi sistem tidak lagi menurun, akan tetapi menunjukkan gejala yang baik yaitu kembali menuju titik D. Naiknya frekuensi dari titik C menuju titik D disebabkan karena daya yang tersedia dalam sistem adalah lebih besar daripada beban setelah mengalami pelepasan beban tahap kedua. Sehingga akhirnya frekuensi normal kembali di titik D.

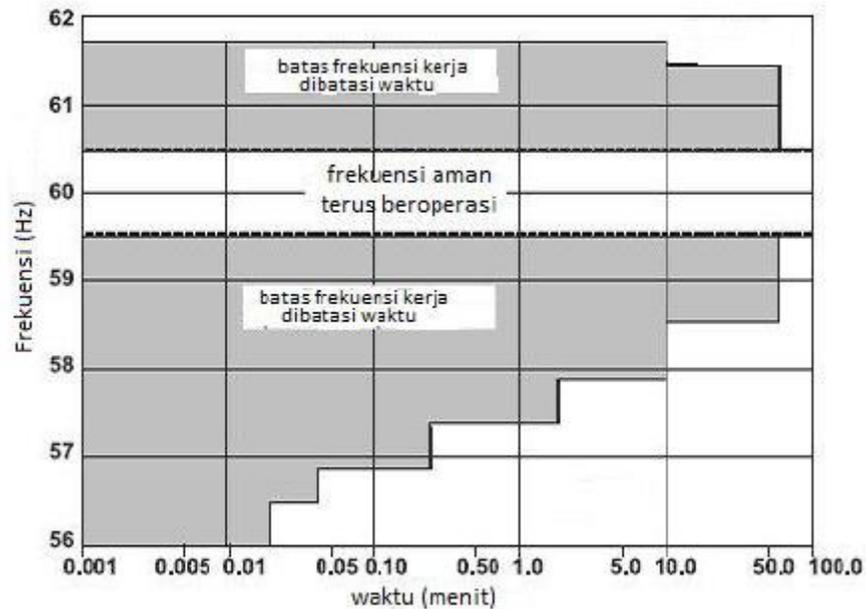
Apabila unit pembangkit yang jatuh tidak begitu besar, mungkin penurunan frekuensi tidak pernah mencapai nilai F_C sehingga pelepasan beban tingkat pertama saja sudah cukup mengembalikan sistem ke frekuensi normal.

2.5.1. Laju penurunan frekuensi

Langkah kedua yang harus dilakukan untuk mendapatkan nilai frekuensi kerja rele dan besar beban efektif yang harus dilepaskan pada setiap tahap pelepasan beban setelah membuat kombinasi generator lepas adalah menghitung laju penurunan frekuensi setiap kombinasi generator lepas. Untuk dapat menghitung besar laju penurunan frekuensi digunakan persamaan *swing* generator.

2.5.2. Frekuensi Pemutus Tenaga Bekerja

Untuk mendapatkan nilai beban yang dilepaskan sesuai dengan kebutuhan sistem tenaga listrik, maka frekuensi yang digunakan sebagai acuan perhitungan kebutuhan beban yang dilepaskan bukan frekuensi saat rele frekuensi bekerja melainkan frekuensi saat pemutus tenaga benar-benar bekerja. Pada tahap ini diasumsikan rele frekuensi pertama kali bekerja saat terjadi penurunan frekuensi pada saat 59,5 Hz dan tidak memiliki waktu tunda. Hal ini sesuai dengan standar frekuensi abnormal yang diijinkan bagi pembangkit listrik tenaga gas yaitu IEEE C37-106 2003 sebagai berikut:



Gambar 2.4 Standar IEEE C37 – 106 2003

Sesuai dengan standar tersebut, generator turbin gas boleh bekerja secara terus-menerus ketika frekuensi kerja memiliki nilai 59,5 – 60,5 Hz dengan frekuensi nominal 60 Hz. Karena usia generator yang relatif tua, maka pada skema pelepasan beban ini dipilih frekuensi 59,5 Hz sebagai frekuensi kerja rele tahap pertama.

2.5.3. Momen Inersia

Untuk sistem yang bergerak memiliki energi kinetik yang tersimpan pada bagian yang bergerak tersebut. Untuk sistem kelistrikan terdapat energi kinetik yang bergerak pada penggerak mula, generator, dan beban yang berputar akan mempengaruhi frekuensi sistem.

Jika terjadi ketidak seimbangan dalam suatu sistem, maka momen inersia yang pertama-tama akan mempertahankan keseimbangan sistem tersebut. Dengan demikian besarnya momen inersia yang dimiliki oleh sistem adalah kemampuan ukur kekuatan dari sistem tersebut. Jika inersia yang dimiliki oleh sistem semakin besar, maka kestabilan sistem akan semakin baik.